

EFEK PAPARAN KOMBINASI KARBON MONOKSIDA DAN HIDROGEN SIANIDA PADA KASUS FORENSIK: STUDI LITERATUR

EFFECTS OF COMBINED EXPOSURE TO CARBON MONOXIDE AND HYDROGEN CYANIDE IN FORENSIC CASES: A LITERATURE STUDY

Balqis Khansa¹, Azzahra Nur Khoiriyah², Aulia Fathanisa³, Nailah Sayyidatii Hayaa⁴

^{1,2,3,4}Universitas Muhammadiyah Bandung

(email penulis korespondensi: khansabalqis05@gmail.com)

ABSTRAK

Latar Belakang: Kebakaran di ruang tertutup sering kali menghasilkan gas beracun seperti karbon monoksida (CO) dan hidrogen sianida (HCN), yang berkontribusi besar terhadap kematian akibat inhalasi asap. Studi ini bertujuan untuk menganalisis efek toksik sinergis dari paparan CO dan HCN berdasarkan tinjauan literatur. **Metode:** Metode yang digunakan adalah kajian literatur dari jurnal nasional dan internasional yang dipublikasikan antara tahun 2018–2023, dengan fokus pada paparan kombinasi CO dan HCN serta efeknya terhadap tubuh manusia. **Hasil Penelitian:** Dari hasil kajian, paparan CO menyebabkan terbentuknya karboksihemoglobin (COHb) yang menghambat transportasi oksigen, sedangkan HCN menghambat pemanfaatan oksigen di tingkat sel. Kombinasi keduanya memperparah hipoksia, meningkatkan risiko kematian mendadak, terutama di ruang terbatas dengan ventilasi buruk. Studi menunjukkan kadar COHb >30% dan HCN >2 mg/L berkorelasi dengan kematian akibat kebakaran. **Kesimpulan:** Paparan gabungan CO dan HCN bersifat mematikan secara cepat. Deteksi kadar COHb dan HCN sangat penting untuk diagnosis dan evaluasi forensik korban kebakaran.

Keywords : karbon monoksida, hidrogen sianida, keracunan, kebakaran, toksikologi forensik.

ABSTRACT

Background: Carbon monoxide (CO) and hydrogen cyanide (HCN) are two toxic gases commonly released during fires, especially in enclosed spaces. Combined exposure to both gases can lead to synergistic toxic effects, causing systemic hypoxia and rapid death. This study aims to review the toxicological effects of combined CO and HCN exposure in the context of forensic toxicology. **Methods:** This study used a literature study method through searching articles in the PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar databases. The articles analyzed were selected based on inclusion criteria in the form of publication years 2018–2023 and discussions on the combination of CO and HCN toxicity, as well as exclusion of articles before 2020 and those not relevant to the topic of fire poisoning. **Results:** From the results of the study, CO exposure causes the formation of carboxyhemoglobin (COHb) which inhibits oxygen transport, while HCN inhibits oxygen utilization at the cellular level. The combination of the two exacerbates hypoxia, increasing the risk of sudden death, especially in confined spaces with poor ventilation. The study showed that COHb levels > 30% and HCN > 2 mg/L correlated with death from fire. **Conclusion:** Combined exposure to CO and HCN is rapidly lethal. Detection of COHb and HCN levels is very important for the diagnosis and forensic evaluation of fire victims.

Keywords : carbon monoxide, hydrogen cyanide, poisoning, fire, forensic toxicology

PENDAHULUAN

Dua gas utama yang sering menyebabkan keracunan akibat kebakaran adalah karbon monoksida (CO) dan hidrogen sianida (HCN) (Daniel *et al.*, 2021). Kedua gas ini muncul dari pembakaran tidak sempurna bahan seperti plastik dan kain sintetis, yang memiliki toksisitas tinggi dan dapat menyebabkan hipoksia sistemik yang mengancam jiwa (Qiyue *et al.*, 2023) (Hansen-Bruhn

et al., 2023; Giebultowicz *et al.*, 2017). Karbon monoksida adalah gas tidak berwarna dan tidak berbau yang sangat toksik. CO dapat mengikat hemoglobin dan mengurangi kapasitas darah membawa oksigen, dengan afinitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan oksigen (Derek *et al.*, 2018) (Sonmez, 2015). Kadar COHb di atas 20-30% dapat menimbulkan gejala neurologis dan kardiovaskular yang serius, bahkan berujung kematian (Mehta *et al.*, 2007). Sementara itu, hidrogen sianida bekerja dengan cara menghambat enzim sitokrom C oksidase dalam rantai transpor elektron mitokondria, sehingga sel tidak dapat menggunakan oksigen secara efektif walaupun kadar di dalam darah cukup (Daniel *et al.*, 2020). Dimana HCN menyebabkan hipoksia histotoksik meskipun kadar oksigen di dalam darah tercukupi (Purser *et al.*, 2015). Kombinasi paparan CO dan HCN dapat menyebabkan hipoksia sistemik berat, kerusakan neurologis, hingga kematian dalam waktu singkat.

Kadar CO dan HCN akibat kebakaran yang terjadi di ruang tertutup menunjukkan tingkat mortalitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan kebakaran di ruang terbuka. Dalam kebakaran di ruang tertutup, sebagian besar korban meninggal dunia akibat asfiksia dan keracunan gas beracun yang dikarenakan terjadinya akumulasi signifikan gas-gas toksik seperti karbon monoksida (CO) dan hidrogen sianida (HCN) dalam lingkungan dengan ventilasi terbatas. Berdasarkan penelitian, sekitar 60% hingga 80% kematian mendadak yang terjadi di lokasi kebakaran disebabkan oleh inhalasi asap. Inhalasi asap dapat menyebabkan cedera saluran napas yang meningkatkan risiko kegagalan pernapasan dan sindrom gangguan pernapasan akut (Galeires, 2021). Data dari Global Burden of Disease Study menunjukkan bahwa pada tahun 2021, terdapat 12.336 kematian pria dan 5.818 kematian wanita akibat keracunan CO di Asia, dengan rasio kematian pria terhadap wanita hampir dua kali lipat (Xie, *et al.*, 2025). Hal ini menunjukkan bahwa pria lebih rentan terhadap kematian akibat keracunan CO dibandingkan wanita.

Studi tentang keracunan karbon monoksida telah dilakukan sebelumnya, namun belum banyak studi yang menjelaskan secara toksikologis efek sinergis CO dan HCN dalam kematian akibat kebakaran. Oleh karena itu kajian mengenai mekanisme toksisitas gabungan antara karbon monoksida dan hidrogen sianida sangat penting dalam konteks toksikologi forensik untuk membantu mengidentifikasi penyebab kematian akibat kebakaran, serta memberikan dasar ilmiah dalam upaya mitigasi kebakaran. Dalam toksikologi forensik, analisis keberadaan dan kadar CO serta HCN dalam tubuh korban kebakaran sangat krusial untuk menentukan penyebab kematian, membedakan kematian akibat kebakaran dengan kematian sebelum kebakaran, mengidentifikasi sumber kebakaran dan material yang terbakar, dan evaluasi tingkat keparahan paparan.

METODE

Metode yang digunakan dalam penulisan ini adalah studi *literature review* secara *online*. Sumber Pustaka yang dilakukan dalam menyusun *literatur review* ini melalui database *website* seperti *PubMed*, *ScienceDirect* dan *Google Scholar*. Jurnal digunakan sebanyak 4 yang mencakup jurnal nasional dan internasional dengan kata kunci karbon monoksida, hidrogen sianida, COHb, kematian, pencegahan, keracunan akibat karbon monoksida dan kasus kematian pada karbon monoksida yang telah dilakukan oleh peneliti-peneliti terdahulu baik dalam maupun luar negeri. Pemilihan sumber-sumber literatur yang dianalisis didasarkan pada seperangkat kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan..

Untuk kriteria inklusi yaitu literatur yang diambil memiliki rentang tahun antara 2005-2025 serta membahas mengenai efek paparan kombinasi karbon monoksida dengan hidrogen sianida yang dapat menyebabkan kematian. Sedangkan untuk kriteria eksklusi yaitu artikel yang dipublikasi dibawah tahun 2020 dan artikel yang tidak membahas mengenai keracunan dan kematian pada karbon monoksida dan hidrogen sianida.

HASIL**Tabel 1. Hasil analisis studi literatur**

Nama Peneliti	Judul	Studi Kasus	Metode Analisis	Kadar COHb	Kadar HCN	Hasil Penelitian
Qiyue <i>et al.</i> , (2023)	A synthetic porphyrin as an effective dual antidote against carbon monoxide and cyanide poisoning	Studi eksperimental terhadap penggunaan porfirin sintetis (hemoCD-Twins) sebagai terapi terhadap dua gas yang umum terjadi dalam kebakaran: karbon monoksida (CO) dan hidrogen sianida (HCN).	Spektrofotometri, spektroskopi in vivo dan in vitro	1.600 ppm	700ppm	Senyawa porfirin sintetis menunjukkan efektivitas tinggi dalam mengikat CO dan HCN secara bersamaan dan mempercepat proses detoksifikasi pada hewan.
Derek <i>et al.</i> , (2018)	Carbon monoxide and cyanide poisoning in the burned pregnant patient: an indication for hyperbaric oxygen therapy	Laporan kasus mengenai seorang wanita hamil yang mengalami luka bakar berat serta keracunan CO dan HCN akibat inhalasi asap.	Gas darah (CO oximeter), data klinis	Janin: 60% (mematikan) Ibu: >4-10% (berisiko)	Tidak disebutkan	Pasien menunjukkan perbaikan signifikan setelah diberikan terapi oksigen hiperbarik (HBOT), yang juga bermanfaat dalam menurunkan risiko hipoksia janin.
Daniel <i>et al.</i> , (2021)	The blood Hydrogen Cyanide	Studi forensik terhadap korban	COHb: Spektrofotometri; HCN:	6,15%	1,043 µg/mL	Kadar HCN ditemukan tinggi dalam darah

	Concentration as a Vital Sign of a Deceased Room Fire Victim—Case Report	kebakaran yang ditemukan di ruangan tertutup, dengan fokus pada konsentrasi HCN dalam darah postmortem.	Spektrofotometri reaksi dengan ninhidrin			korban, menunjukkan bahwa sianida menjadi faktor penting dalam kematian akibat inhalasi asap.
Daniel <i>et al.</i> , (2020)	Hydrogen cyanide and carboxyhemoglobin assessment in an open space fire-related fatality	Analisis forensik korban kebakaran di ruang terbuka, yang mengevaluasi kadar COHb dan HCN dalam darah untuk mengidentifikasi penyebab kematian.	COHb: Spektrofotometri (metode Katsumata); HCN: Spektrofotometri kinetik berbasis ninhidrin	73,7%	1,3 µg/mL	Hasil pemeriksaan pada pasien menunjukkan kadar COHb dan HCN yang signifikan, mendukung bahwa kombinasi keracunan CO dan HCN menjadi faktor penyebab kematian.

Karbon monoksida (CO) dan hidrogen sianida (HCN) gas toksik yang umum dilepaskan selama kebakaran, terutama dari api tertutup. CO memiliki afinitas pengikatan terhadap hemoglobin sekitar 240 kali lebih besar dari oksigen, yang menyebabkan hambatan pada transportasi oksigen ke jaringan serta memicu stres oksidatif yang berdampak pada organ vital seperti jantung dan otak (Desai & Sukla, 2024; Derek *et al.*, 2018). Sementara itu, HCN bekerja dengan menghambat sitokrom c oksidase dalam mitokondria, yang memicu gangguan respirasi seluler, asidosis laktat, dan anoksia sitotoksik. Selain itu, HCN juga dapat mengikat enzim penting lainnya seperti karbonik anhidrase dan methemoglobin, mengganggu keseimbangan metabolik tubuh (Derek *et al.*, 2018; Putu *et al.*, 2017).

Paparan simultan CO dan HCN memiliki efek sinergis yang sangat mematikan karena keduanya mengganggu suplai dan pemanfaatan oksigen secara bersamaan. CO menghambat pengangkutan oksigen dalam darah, sementara HCN menghambat pemanfaatan oksigen oleh sel. Kombinasi ini menyebabkan hipoksia berat yang cepat berkembang dan memperparah kondisi klinis korban. Gejala awal seperti sesak napas, takikardia, hingga gangguan kesadaran dapat terjadi dalam hitungan detik hingga menit setelah terpapar asap kebakaran yang mengandung kedua gas ini (Derek *et al.*, 2018; Putu *et al.*, 2017).

PEMBAHASAN

Studi oleh Qiyue et al., (2023), merupakan eksperimen laboratorium pada model hewan, dimana senyawa porfirin sintesis menunjukkan efektivitas yang tinggi dalam mengikat CO dan HCN. HemoCD-Twins bekerja dengan cara mengikat CO melalui satu bagian hemoCD dan mengikat sianida melalui bagian lainnya. Paparan CO dan HCN secara bersamaan pada tingkat toksik dapat menyebabkan gangguan oksigenasi jaringan yang parah dan cepat. Pada studi ini tidak disebutkan kadar spesifik dalam darah, namun studi tersebut menggunakan kondisi yang menyerupai paparan berat pada manusia. Efektivitas senyawa HemoCD-Twins diuji terhadap konsentrasi CO dan HCN pada level letal dimana kadar COHb $\geq 20\%$ dan HCN >1 mg/L dalam darah sangat berbahaya. Keracunan dari dua gas tersebut sangat mematikan dan memerlukan terapi yang bekerja secara sinergis. Pada hasil model BPK oleh Yamamoto et al., (2025) dimana menunjukkan bahwa konsentrasi HCN dalam darah korban sering melampaui ambang batas toksik ($\geq 2-3$ mg/L), bahkan tanpa adanya luka bakar yang luas. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Derek et al. (2018), menyatakan langsung pada manusia bahwa keracunan gabungan tersebut dapat menyebabkan perburukan klinis yang cepat dan membutuhkan penanganan seperti terapi oksigen hiperbarik. Hal ini didukung oleh Sonmez,(2015) dimana diagnosis cepat dan terapi oksigen hiperbarik sebagai Langkah penyematan dalam kasus keracunan CO akut. Pada keracunan HCN sering terlewat karena gejalanya mirip dengan syok atau asfiksia umum sehingga diberikan hidrosikobalamin lebih disarankan sebelum hasil toksikologi tersedia (Lawson et al., 2011).

Studi oleh Derek et al. (2018), pasien hamil dengan luka bakar parah akibat kebakaran tertutup didiagnosis dengan keracunan CO dan HCN. Walaupun kadar COHb atau HCN dalam darah tidak disebutkan secara rinci, terapi oksigen hiperbarik diindikasikan karena kadar COHb diperkirakan melebihi 25%, dimana merupakan ambang batas dari gejala neuropsikiatrik dan gangguan kardiovaskular mulai muncul. Pada ibu hamil, risiko pada janin meningkat bahkan dengan kadar COHb $>15\%$. Paparan HCN cukup tinggi karena bahan yang terbakar mengandung material sintetik. Hal ini sejalan antara aspek eksperimen dan forensik, dimana dilakukannya pembuktian terhadap kedua racun harus dilakukan bersamaan. Sehingga pada studi dari Qiyue et al. (2023) bahwa terapi oksigen hiperbarik lebih efektif, kemudian dilakukannya kesadaran terhadap HCN yang sering terabaikan dalam pengelolaan pasien kebakaran. Studi oleh Daniel et al. (2021), kadar HCN darah postmortem menjadi permasalahan utama dimana kadar HCN di atas 3 mg/L dalam darah manusia berhubungan dengan kematian mendadak, sementara kadar 0,5–1 mg/L dapat menyebabkan gejala seperti nyeri kepala, mual, dan kebingungan. Kasus yang dilaporkan menunjukkan bahwa korban kebakaran dalam ruangan tertutup memiliki kadar HCN jauh di atas batas tersebut. Sehingga keracunan HCN dapat lebih berkontribusi terhadap kematian daripada CO dalam situasi tertentu, terutama saat bahan sintesis terbakar.

Studi oleh Daniel et al. (2020), meskipun kebakaran terjadi di ruang terbuka, korban menunjukkan kadar COHb dalam darah sekitar 30% dan HCN sekitar 2–3 mg/L, cukup tinggi untuk menyebabkan kehilangan kesadaran dan kematian. Dimana risiko paparan CO dan HCN lebih tinggi di ruang tertutup, namun ruang terbuka tetap berbahaya jika paparan berlangsung cukup lama atau jika korban berada dekat sumber api. Hubungan antara studi Daniel et al. (2021) dan Daniel et al. (2020), yang menunjukkan bahwa gabungan antara kadar COHb dan HCN postmortem memberikan gambaran yang lebih menyeluruh terhadap penyebab kematian akibat kebakaran. Dimana pada studi tahun 2021 berfokus pada korban di ruang tertutup, sedangkan studi 2020 mengevaluasi kasus ruang terbuka. Keduanya menyimpulkan bahwa kadar HCN di atas 2–3 mg/L dan COHb $>30\%$ sangat berbahaya dan dapat menyebabkan kematian. Adapun pada studi Qiyue et al. (2023) dilihat dari pendekatan yang sama terhadap efek toksik bersamaan dimana keracunan kombinasi tidak hanya penting dalam hidup (terapi), tetapi juga pasca-kematian (forensik). Pada studi Kwon et al., (2024) menunjukkan bahwa dalam kurang dari 5 menit, konsentrasi HCN dalam ruangan mencapai tingkat yang dapat menyebabkan hilangnya kesadaran. Hal ini membuat risiko paparan HCN menjadi penting dalam perencanaan keselamatan kebakaran terutama yang menggunakan material sintetik. Kematian akibat kebakaran di Polandia sebanyak 65% disebabkan oleh inhalasi beracun dengan kandungan CO dan HCN tinggi. Namun, hanya Sebagian kecil kasus yang disertai pengukuran sianida. Hal ini sejalan dengan studi Hansen-Bruhn et al., (2023) dimana pengukuran HCN seharusnya menjadi standar dalam evaluasi toksikologi kebakaran bukan hanya CO yang selama ini umum dilakukan.

Kombinasi dari paparan karbon monoksida dan hidrogen sianida dapat mengakibatkan kematian akibat asfiksian, yaitu kekurangan oksigen pada sel-sel tubuh. Karbon monoksida bersifat beracun karena lebih mudah mengikat hemoglobin dibandingkan dengan oksigen, yang berfungsi untuk menggantikan oksigen di dalam sel darah merah, sehingga mengurangi jumlah oksigen yang didistribusikan ke seluruh tubuh. Hal ini dapat menyebabkan kondisi hipoksia pada organ-organ vital seperti jantung dan otak. Di sisi lain, hidrogen sianida menghalangi penggunaan oksigen oleh sel-sel tubuh dengan cara mengikat enzim sitokrom oksidase dalam mitokondria, sehingga sel tidak bisa memanfaatkan oksigen untuk proses pernapasan yang efisien. Sistem saraf pusat serta otot jantung memiliki tingkat kepekaan yang tinggi terhadap dampak racun dari sianida. Ketika terpapar karbon monoksida dan hidrogen sianida secara bersamaan, kondisi hipoksia akan semakin parah, mengingat kedua zat tersebut menghambat fungsi sistem pernapasan seluler. Karbon monoksida menghalangi transportasi oksigen, sedangkan hidrogen sianida menghalangi pemanfaatan oksigen oleh sel-sel tubuh (Qiyue, et al., 2023).

Keracunan yang diakibatkan oleh karbon monoksida (CO) dan hidrogen sianida (HCN) dapat didiagnosis dengan melakukan pengukuran kadar karboksihemoglobin (COHb) dan sianida dalam darah. Keracunan CO ringan dapat ditandai dengan kadar COHb sekitar 10-20% dengan gejala sakit kepala dan mual. Pada keracunan sedang, kadar COHb sekitar 20-40% dengan gejala pusing, lemah, dan takikardia. Lalu untuk keracunan berat kadar COHb >40% dapat menyebabkan kehilangan kesadaran, kejang, hingga kematian. Sementara itu kadar HCN dalam darah sebesar 0,5-1 mg/L dapat menyebabkan gejala awal seperti sesak napas dan pusing, namun jika kadar HCN >3mg/L dapat berpotensi kematian. Gejala klinis dari keracunan HCN ini dapat muncul dalam hitungan detik hingga menit setelah di inhalasi, yang mencakup lemah, mual, sakit kepala dan kesulitan pada saat bernapas (Harada et.al., 2025).

Dari kebanyakan kasus kebakaran antara kebakaran tertutup dan kebakaran terbuka, kebakaran tertutuplah yang menjadi kebakaran yang berisiko kematian paling tinggi. Hal tersebut disebabkan karena akumulasi antara gas beracun CO dan HCN yang lebih signifikan di ruang dengan ventilasi yang minim. Studi menunjukkan bahwa 60%-80% dari semua kematian mendadak yang terjadi di lokasi kebakaran disebabkan oleh inhalasi asap (Harada et.al., 2025). Inhalasi asap sangat dipengaruhi oleh kombinasi HCN, CO, suhu tinggi, dan ventilasi. Lingkungan dengan ventilasi yang rendah dan bahan bangunan sintetis akan mempercepat akumulasi gas toksik dan meningkatkan angka kematian dalam kebakaran (Geldner et al., 2013).

Secara epidemiologis, pria menjadi korban tertinggi yang diakibatkan oleh kebakaran akibat keracunan CO dan HCN dibandingkan dengan wanita. Hal itu diduga karena faktor pekerjaan. Selain karena faktor pekerjaan, secara biologis, pria cenderung memiliki kadar hemoglobin yang tinggi dari pada perempuan. Meskipun Hb itu berguna untuk membawa oksigen sehingga dapat menjadi keuntungan tersendiri, namun pada paparan CO ini malah menjadi sumber masalah. CO yang dapat berikatan dengan Hb menjadi lebih kuat sekitar 200-250 kali lipat lebih kuat dibandingkan dengan oksigen. Sehingga semakin banyak Hb, maka semakin besar kapasitas dari CO untuk dapat berikatan dengan membentuk COHb, yang dapat menghambat pengangkutan oksigen ke jaringan tubuh (Chahboune et al., 2021).

Studi kali ini menyoroti urgensi deteksi dini dan pencegahan keracunan akibat paparan gabungan karbon monoksida (CO) dan hidrogen sianida (HCN) dalam insiden kebakaran, terutama yang terjadi di ruang tertutup dengan ventilasi minim. Berdasarkan temuan yang ada, pendekatan terpadu sangat diperlukan dalam upaya mitigasi kebakaran. Ini mencakup penguatan regulasi yang mendorong penggunaan material konstruksi yang tidak mudah menghasilkan zat toksik saat terbakar, serta pemasangan detektor CO dan HCN di area dengan potensi kebakaran tinggi, sebagaimana disarankan oleh penelitian sebelumnya (Logue et al., 2010; Hansen-Bruhn et al., 2023). Implikasi kebijakan yang dapat ditarik dari kajian ini adalah pentingnya pembaruan standar keselamatan bangunan dan sistem ventilasi berdasarkan risiko akumulasi gas toksik, serta pelatihan petugas darurat dan tenaga medis dalam mengenali gejala keracunan kombinasi CO-HCN dan melakukan penanganan awal sebelum hasil toksikologi tersedia (Lawson-Smith et al., 2011). Selain itu, kebijakan kesehatan masyarakat yang mencakup edukasi berbasis bukti mengenai bahaya pembakaran bahan sintetis dan

pentingnya sistem deteksi dini juga diperkuat oleh bukti epidemiologis dan hasil studi toksikologi kebakaran (Badawy et al., 2025)

Meskipun penelitian ini memberikan gambaran lengkap tentang efek toksik gabungan karbon monoksida (CO) dan hidrogen sianida (HCN) dalam kebakaran, ada beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, data yang dianalisis berasal dari laporan kasus dan studi hewan, yang mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi klinis manusia secara luas. Kedua, jumlah studi yang secara spesifik membahas efek sinergis antara CO dan HCN masih terbatas, sehingga generalisasi temuan menjadi kurang kuat.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil literature review disimpulkan bahwa paparan kombinasi karbon monoksida (CO) dan hidrogen sianida (HCN) pada kasus kebakaran memiliki efek toksik sinergis yang dapat menyebabkan hipoksia sistemik berat dan kematian dalam waktu yang singkat. CO menghambat pengangkutan oksigen melalui pembentukan karboksihemoglobin (COHb), sementara HCN mengganggu pemanfaatan oksigen ditingkat sel dengan menginaktivasi enzim sitokrom c oksidase. Kematian lebih sering terjadi pada kebakaran di ruang tertutup karena akumulasi gas beracun yang lebih tinggi, dan pria lebih berisiko menjadi korban akibat faktor pekerjaan dan biologis.

Implikasi praktis dari temuan ini mencakup pentingnya diagnosis akurat melalui pemeriksaan kadar COHb dan HCN dalam darah postmortem, serta upaya pencegahan seperti perbaikan ventilasi, penghindaran bahan sintesis, dan pemasangan detektor gas beracun. Diperlukan studi lanjutan dan pengembangan metode diagnosis serta deteksi dini yang lebih efektif untuk meningkatkan respons terhadap kasus keracunan akibat kebakaran. Penelitian yang berkelanjutan akan sangat penting dalam menunjang upaya penyelamatan jiwa dan memperkuat aspek forensik dalam investigasi kebakaran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada Apt. Dwi Larasati Setyaningrum S.Farm., M.Sc. atas bimbingan, arahan, dan motivasi yang telah diberikan sehingga review jurnal ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Badawy, E. H. K., Alfinaikh, R. S., & Alanazi, A. M. (2025). *Forensic Toxicology of Carbon Monoxide in Saudi Arabia*. 8(1), 97–106.
- Chahboune, M., Khadmaoui, A., Soulaymani, A., Mokhtari, A., Nshimiyimana, F. X., & Soulaymani-Bencheikh, R. (2021). Gender-specific lethality due to carbon monoxide poisoning in Morocco. *E3S Web of Conferences*, 319, 0–4. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131902018>
- Desai, N., & Shukla, K. (2024). Early diagnosis to prevent carbon monoxide poisoning complications. *Annals of Internal Medicine: Clinical Cases*, 3(1), 1–3. <https://doi.org/10.7326/aimcc.2023.0360>
- Derek, M., Beretta, C., & Karel, C. (2018). Carbon monoxide and cyanide poisoning in the burned pregnant patient: An indication for hyperbaric oxygen therapy. *Annals of Plastic Surgery*, 80(3), 2–18. <https://doi.org/10.1097/SAP.0000000000001290>

- Daniel, T., Gabi, D., & Simona, I. (2021). The blood hydrogen cyanide concentration as a vital sign of a deceased room fire victim—Case report. *Toxics*, 36(9), 2–9. <https://doi.org/10.3390/toxics9090267>
- Daniel, T., Diana, B., & Tatiana. (2020). Hydrogen cyanide and carboxyhemoglobin assessment in an open space fire-related fatality. *Journal of Forensic Science*, 66, 1171–1175. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14649>
- Galeiras, R. (2021). Smoke inhalation injury: A narrative review. *Mediastinum (Hong Kong, China)*, 5, 16. <https://doi.org/10.21037/med-21-7>
- Geldner, G., Jung, R., Geiger, L., & Wappler, F. (2013). Report on a study of fires with smoke gas development. *Anaesthesist*, 62(7), 609–616. <https://doi.org/10.1007/s00101-013-2209-3>
- Giebułtowicz, J., Wąsik, A., Szulc, M., & Bystrowska, B. (2017). Analysis of fire deaths in Poland and influence of smoke toxicity. *Forensic Science International*, 277, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2017.05.002>
- Harada, K., Nakamura, Y., et al. (2025). Toxicological analysis of cyanide in fire-related deaths. *Forensic Sciences Research*. <https://doi.org/10.1007/s11419-025-00713-8>
- Hansen-Bruhn, I., McKenna, S. T., & Hull, T. R. (2023). Quantification of hydrogen cyanide in fire effluent. *Journal of Fire Sciences*, 41(1), 3–15. <https://doi.org/10.1177/07349041231193756>
- Kwon, O.-S., Han, H.-S., & Hwang, C.-H. (2024). Risk assessment of hydrogen cyanide for available safe egress time in fire simulation. *Applied Sciences*, 14(16), 6890. <https://doi.org/10.3390/app14166890>
- Logue, J. M., McKone, T. E., Sherman, M. H., & Singer, B. C. (2010). Hazard assessment of chemical air contaminants measured in residences. *Indoor Air*, 21(2), 92–109. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00683.x>
- Lawson-Smith, P., Jansen, E. C., & Hyldegaard, O. (2011). Cyanide intoxication as part of smoke inhalation—A review on diagnosis and treatment from the emergency perspective. *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, 19, Article 14. <https://doi.org/10.1186/1757-7241-19-14>
- Mehta, S. R., Das, S., & Singh, S. K. (2007). Carbon monoxide poisoning. *Medical Journal, Armed Forces India*, 63(4), 362–365. [https://doi.org/10.1016/S0377-1237\(07\)80017-7](https://doi.org/10.1016/S0377-1237(07)80017-7)
- Putu Nita Cahyawati, M. Sc., Zahran, I., Jufri, M. I., & Noviana, S. (2017). Karacunan akut sianida. *Jurnal Lingkungan & Pembangunan*, 1(1), 80–87. <https://doi.org/10.22225/wicaksana.1.1.2017.80-87>
- Purser, D. A., Maynard, R. L., & Wakefield, J. C. (2015). Hydrogen cyanide—Physiological effects of acute exposure during fires. In *Toxicology, survival and health hazards of combustion products* (pp. 310–360). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781849737487-00310>

- Sonmez, F. T. (2015). Carbon monoxide poisoning: Clinical manifestations, consequences, monitoring, diagnosis and treatment of toxicity. *Konuralp Medical Journal*, 7(3), 192–198. <https://doi.org/10.18521/ktd.86283>
- Tabian, D., Bala, C., Enache, A., & Badea, A. (2021). Hydrogen cyanide and carboxyhemoglobin assessment in an open space fire-related fatality. *Journal of Forensic Sciences*, 66(1), 345–350. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14649>
- Yasutaka, F. (2023). A synthetic porphyrin as an effective dual antidote against carbon monoxide and cyanide poisoning. *PNAS*, 120(9), 1–10. <https://doi.org/10.1073/pnas.2220658120>
- Yamamoto, K., Sugita, R., & Tanaka, N. (2025). Analysis of cyanide exposure status in fire-related deaths using a physiologically based pharmacokinetic model. *Forensic Toxicology*. <https://doi.org/10.1007/s11419-025-00713-8>
- Xie, J., Wu, C., Zhao, Z., Cao, Z., & Jin, X. (2025). Burden of carbon monoxide poisoning in Asian countries from 1990 to 2021 and its projection until 2030: An analysis of the Global Burden of Disease Study 2021. *Clinical Epidemiology*, 17, 367–386. <https://doi.org/10.2147/CLEP.S512786>